

Antti Korhonen

JÄYSTEEN MITTAUS KONENÄKÖSOVELLUKSEN AVULLA

Insinöörityö
Kajaanin ammattikorkeakoulu
Tekniikan ja liikenteen ala
Tietotekniikan koulutusohjelma
Kevät 2008



**Kajaanin
ammattikorkeakoulu**

OPINNÄYTETYÖ TIIVISTELMÄ

Koulutusala Tekniikka ja liikenne	Koulutusohjelma Tietotekniikka
Tekijä(t) Antti Korhonen	
Työn nimi Jäysteen mittaus konenäkösovelluksen avulla	
Vaihtoehtoiset ammattiopinnot Konenäkö	Ohjaaja(t) Pentti Romppainen Toimeksiantaja ABB Motors Oy
Aika Kevät 2008	Sivumäärä ja liitteet 32
<p>Tämän insinöörityön tarkoituksena oli luoda luotettava konenäköön perustuva sovellus jäysteen mittaukselle roottori- ja staattorilevyistä Vaasaan ABB Motors Oy -yksikölle.</p> <p>Tänä päivänä jäystettä mitataan käsin jäystemittarilla. Sen määrittäminen vie oman aikansa, ja tuloksiin liittyy inhimillisiä epävarmuustekijöitä. Uuden konenäköön perustuvan järjestelmän avulla jäysteen mittaus voitaisiin suorittaa nopeammin, helpommin ja ilman, että tuloksiin sisältyisi käyttäjästä aiheutuvia tekijöitä.</p> <p>Sivultapäin suunnattu valo saa aikaan varjon metallilevylle, jonka pituus on suhteessa jäysteen korkeuteen. Jäysteen varjokuva kuvataan kameralla, ja saatu kuva viedään LabVIEW:illä ohjelmoituun ohjelmaan. Se suorittaa kuvalle kuvankäsittelyoperaatioita, joiden perusteella varjon pituus mitataan ja tulostetaan näytölle.</p> <p>Rakennettuun järjestelmään kuuluu IEEE 1394 -standardiliittimellä varustettu digitaalinen CMOS-kamera, LED-valaisinkytkentä sekä LabVIEW-ohjelmointikielellä luotu ohjelma jäysteen mittaamiseksi. Järjestelmälle asetettiin vaatimukseksi mitata tuloksia 10 µm:n epätarkkuudella.</p> <p>Kyseisen järjestelmän tarkkuuteen vaikuttavat mm. optiikka, kalibrointikerroin sekä kuvankäsittelymenetelmät. Kuitenkin 10 µm:n epätarkkuusvaatimus saatiin toteutettua.</p>	
Kieli	Suomi
Asiasanat	Konenäkö, jäysteen mittaus
Säilytyspaikka	<input type="checkbox"/> Kajaanin ammattikorkeakoulun Kaktus-tietokanta <input type="checkbox"/> Kajaanin ammattikorkeakoulun kirjasto

School Engineering	Degree Programme Information technology
Author(s) Antti Korhonen	
Title Burr Measurement Using Machine Vision Application	
Optional Professional Studies Machine Vision	Instructor(s) Pentti Romppainen
	Commissioned by ABB Motors Oy
Date Spring 2008	Total Number of Pages and Appendices 32
<p>The objective of this bachelor's thesis was to create a reliable system based on machine vision to measure burr from the rotor and stator plates. The thesis was commissioned by ABB Motors OY Vaasa unit.</p> <p>Nowadays burr is measured manually with burr measurement instruments. Measuring with these instruments can take a while and the results are affected by human uncertainty factors. By using the new system burr could be measured faster and easier without user-related factors.</p> <p>When light is pointed from the side to a rotor or stator plate it causes a shadow which length is related to burr's height. Burr's shadow image will be captured by a camera which is transferred to a program created with LabVIEW. The program will perform image processing operations to the image from where the shadow's length can be measured and displayed.</p> <p>The built system consists of an IEEE 1394 standard CMOS-digital camera with a 6-pin connector, LED-luminaire that is directed from the side and a program that is made using the LabVIEW-programming language to measure burr. 10 µm was set as the target inaccuracy.</p> <p>The system accuracy depends on optics, illumination, calibration factor and the methods used in digital image processing. However, the 10 µm inaccuracy requirements can be achieved.</p>	
Language of Thesis Finnish	
Keywords	Machine Vision, Burr Measurement
Deposited at	<input type="checkbox"/> Kaktus Database at Kajaani University of Applied Sciences <input type="checkbox"/> Library of Kajaani University of Applied Sciences

ALKUSANAT

Insinöörityö tehtiin Vaasaan ABB Motors Oy -yksikölle. Työ valmistui kolmen kuukauden kuluessa Kajaanin ammattikorkeakoulun konenäkölaboratoriossa. Ohjauksesta haluaisin kiittää valvojaani Pentti Romppaista, sekä kielenohjauksesta Eero Soinista. Kiitän myös ABB Motors Oy:n laatuinsinööri Marko Blomqvistia, joka toimi yhteyshenkilönä. Kiitokset kuuluvat myös Seija Heikkiselle englanninkielisen abstraktin ohjaamisesta.

Kajaanissa 11.4.2008

SISÄLLYS

1 JOHDANTO	1
2 KONENÄKÖJÄRJESTELMÄ	2
2.1 Kamerate	2
2.2 Optiikka	3
2.3 Valaisimet	5
2.4 Kuvankaappauskortit	8
3 DIGITAALINEN KUVANKÄSITTELY	10
3.1 Segmentointi	10
3.2 Morfologiset operaatiot	10
4 TYÖSSÄ KÄYTETYT LAITTEISTOT JA OHJELMISTOT	12
4.1 Vanha laitteisto	12
4.2 Uusi laitteisto	14
4.2.1 Kamera	15
4.2.2 Objektiivi	16
4.2.3 Valaisinjärjestelmä	17
4.2.4 Ohjelmistot	18
5 OHJELMISTON TOTEUTTAMINEN	23
6 TESTAUS	26
6.1 Kalibrointi	26
6.2 Testitulokset	28
7 TULOKSET JA NIIDEN TARKASTELU	31
8 YHTEENVETO	32
LÄHTEET	

KÄYTETTYJÄ LYHENTEITÄ

CCD	Charged Coupled Device
CMOS	Complementary Metal Oxide Semiconductor
DIN	Deutsches Institut für Normung (saksalainen standardijärjestelmä)
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
LabVIEW	Labortatory Virtual Instrumentation Engineering Workbench
ROI	Region of Interest

1 JOHDANTO

ABB on suuri sähkövoima- ja automaatioteknologiayhtymä, joka toimii n. 100 maassa ja on alallaan maailman johtavia. Suomessa ABB:n toiminta keskittyy sähkövoima- ja automaatioteknologian erikoisosaamiseen. Vaasassa toimii ABB Motors Oy -osasto, joka keskittyy rakentamaan laadukkaita sähkömoottoreita.

Kun metallilevyä porataan, leikataan, jyrsitään, sorvataan tai meistetään, syntyy sen reunoille jäystettä. Metallilevyjä työstetään hyvin usein meistinkoneella, joka "lyö" levyyn halutunlaisen muodon. Jäyste syntyy iskusuunnasta poispäin syntyneen reiän ympärille ja on meistimen terän terävyydestä ja metallilevyn materiaalista riippuen selvemmin tai heikommin havaittavissa. Jäysteen voi tuntea hieromalla kevyesti sormenpäällä leikkuukohtan reunoja, ja ne voivat olla hyvinkin teräviä.

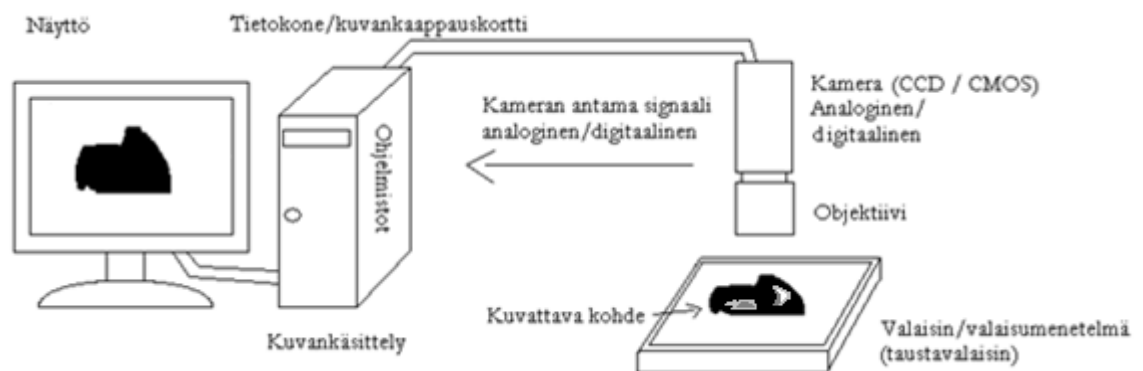
Jäyste on hankalaa mitata tavanomaisilla menetelmillä, sillä se voi olla hyvin pientä. Vaikka jäyste onkin pientä ja huomaamatonta, on sen olemassa olo haitallista tarkkuutta vaativassa kasauksessa. Esimerkiksi roottorilevyjä puristettaessa kasaan jopa 100 μm :n jäysteen olemassa olo jokaisessa levyssä saattaa pyöräyttää levyjen aseman toisiinsa nähden merkittävästi ja täten tehdä roottorin käyttökelvottomaksi.

Tämä insinöörityö on jatkoa Jarno Sarhaluoman tekemään insinöörityöhön "Roottori- ja staattorilevyjen laaduntarkastus konenäöllä", jossa tarkasteltiin levyjen eri dimensioita ja mittoja.

Tässä insinöörityössä pyrittiin luomaan järjestelmä, joka mittaa luotettavasti ABB:n valmistamiin staattori- ja roottorilevyihin syntynyttä jäystettä. Jäystettä mitataan konenäkösovelluksen avulla, jonka ansiosta sitä voidaan mitata helposti ilman inhimillisiä epävarmuustekijöitä. Rakennetun järjestelmän vaatimukseksi asetettiin 10 μm :n epätarkkuus mittauksissa.

2 KONENÄKÖJÄRJESTELMÄ

Konenäköjärjestelmään kuuluu vähintäänkin tietokone, kamera ja siihen sopiva optiikka, jolla tarkastellaan haluttua kohdetta. Järjestelmään kuuluu myös tyypillisesti sovellukselle sopiva valaistus, jonka avulla tarkasteltava kohde tuodaan voimakkaammin esille. Kameramallista riippuen järjestelmässä on usein myös kuvankaappauskortti, jonka tehtävänä on muuttaa kameralta lähtevä analoginen signaali digitaalseksi. Kameralta tai kuvankaappauskortilta saatu kuva käsitellään tietokoneen avulla toimivassa kuvankäsittelyohjelmassa, joka etsii ja analysoi kuvasta haluttuja ominaisuuksia. Kuvassa 1 on esimerkki mahdollisesta konenäköjärjestelmästä.



Kuva 1. Kohteen siluettia (kappaleen ääriviivoja) tarkasteleva konenäköjärjestelmä

2.1 Kameran

Kameroita on yleisesti ottaen kahdenlaista; analogisia ja digitaalisia. Molemmissa kameratyypeissä kuva tallennetaan nykyään CCD- tai CMOS-kennolle. Se, kumpaa kennotyyppiä kannattaa käyttää, riippuu sovelluskohteesta.

Analogiset kamerrat tallentavat kuvan aikariippuvaisena analogisena signaalina CCD- tai CMOS-kennolle (videosignaali). Analogisten kameroiden signaali tulee digitoida, jotta kuvaa voitaisiin käsitellä PC:n kuvankäsittelyohjelmilla. Tähän tarkoitukseen tarvitaan tietokoneen väyliin asennettavia kuvankaappauskortteja, jotka muuttavat aika- ja paikkariippuvaisen signaalin digitaalseksi.

Digitaaliset kamerat antavat kuvainformaationsa jo digitaalisena, mutta saattavat vaatia siitäkin huolimatta kuvankaappauskortin rajapinnaksi kameran ja koneen välillä. Nykyään on saatavilla digitaalisia kameroita, jotka voidaan liittää suoraan tietokoneen portteihin. Näitä ovat mm. USB 2.0 ja IEEE 1394 -kamerat.

CCD-kamerat

CCD-kameroissa käytetään nimensä mukaisesti CCD-kennoa, joka keksittiin jo 1970-luvulla. CCD-kennon nimitys tulee sanoista *Charged-Coupled Device*, jossa esim. MOS-kondensaattoreiden hilan alle syntynyt varaus siirretään kennon sarakkeista rivi kerrallaan vaakasuoraan siirtorekisteriin, ja sieltä edelleen varausjännitemuuntimelle. Tästä johtuen CCD-kennolta tapahtuva informaation luenta on mahdollista ainoastaan rivi kerrallaan, kun taas CMOS-kennolta lukeminen onnistuu yksittäisestä pikselistä. Tehonkulutukseltaan CCD-kenno kuluttaa jopa 70 % enemmän tehoa kuin CMOS-kenno. Yleisesti ottaen CCD-kameroilla saadaan laadukkaampaa kuvaa kuin CMOS-kameroilla, sillä sen herkkyys ja signaalikohinasuhde on parempi.

CMOS-kamerat

CMOS-kameroiden nimitys tulee sen valmistustekniikasta (*Complementary Metal Oxide Semiconductor*). Kuten CCD-kennossa, hilan alle syntynyt varaus muutetaan jänniteeksi, mutta muunnos suoritetaan kennon jokaiselle pikselille. CMOS-kameran tarkkuus ei ole CCD-kameran veroinen, sillä CMOS-kennon rakenne vie enemmän tilaa.

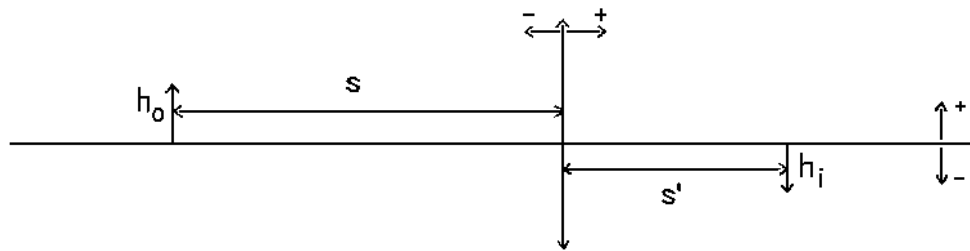
2.2 Optiikka

Klassillisessa optiikassa pyritään kuvaamaan valonsäteen etenemistä systeemissä. Optiikka kiinnittää huomiota mm. valon taittumiseen linseissä. Kameran objektiivilla on suurin merkitys muodostuvaan kuvaan. Sillä voidaan säätää mm. polttoväliä f sekä aukkolukua, jotka molemmat vaikuttavat merkittävästi kuvanlaatuun. [3].

Yleisin käytetty kuvanmuodostumisyhtälö on Gaussin kuvausyhtälö, jolla voidaan tarkastella kameraoptiikkaa valittaessa huomioitavia tekijöitä

$$\frac{1}{s'} - \frac{1}{s} = \frac{1}{f}, \quad (1)$$

jossa s' on kuvan etäisyys linssistä, s kuvattavan kohteen etäisyys linssistä ja f on polttoväli. Yhtälöön sisältyy myös merkkikonventiot, jotka ovat esitetty kuvassa 2. Kuperien linssien polttovälit ovat positiivisia ja koverien linssien polttovälit ovat vastaavasti negatiivisia. Alla olevassa kuvassa h_o ja h_i ovat esineen ja kuvan korkeuksia [1].



Kuva 2. Gaussin kuvausyhtälön merkkikonventiot [1.]

f- ja aukkoluku

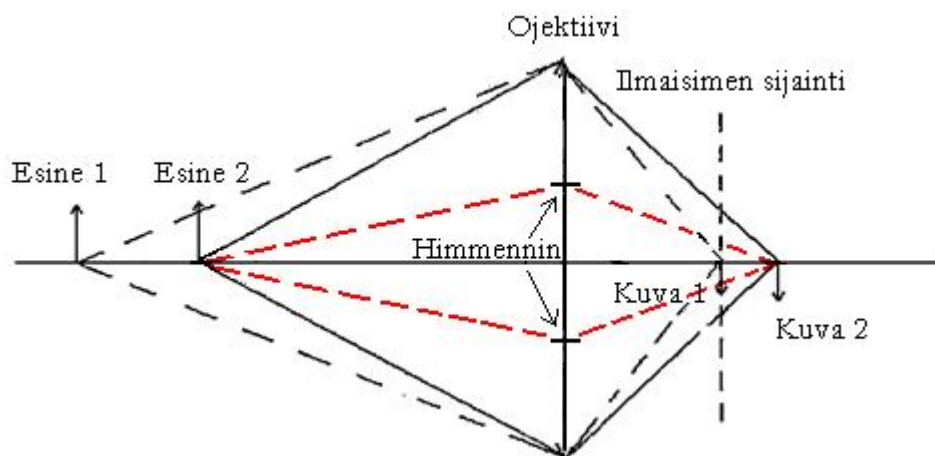
Kuvan muodostukseen vaikuttaa myös oleellisesti f-luku. Sillä pyritään ilmaisemaan valon määrän pääsemistä objektiin läpi kennolle. Objektiiveissa voidaan yleisesti säätää aukkolukua himmentimen avulla. f-luku on sama asia, kuin aukkoluku himmentimen ollessa täysin auki. Aukkoluku ilmoitetaan DIN-järjestelmässä $\sqrt{2}$:n kerrannaisina muodossa 1, 1,4, 2, 2,8 jne. Pieni aukkoluku tarkoittaa suurta himmentimen aukkoa, eli mitä pienempi aukkoluku on, sitä enemmän valoa pääsee himmentimen läpi. f-luku määritellään seuraavasti

$$f - \text{luku} = \frac{\text{efektiivinen polttoväli}}{\text{tulopupillin halkaisija}} \quad (2)$$

Aukkoluku vaikuttaa kuvattavan kohteen syvyystarkkuuteen. Mikäli himmentimen aukko on suuri, pääsee kennolle tulemaan valoa suuremmilla kulmilla aiheuttaen täten syvyyspätarkkuutta. [1.]

Kuvassa 3 esine 1 on fokusoitu tarkasti ilmaisimelle. Jos esinettä 2 kuvataan samalla aukkoluvulla, huomataan, että kuva 2 ei tarkennu ilmaisimelle yhtä tarkasti kuin kuva 1. Esineestä 2

lähtevää valoa voidaan fokusoida ilmaisimelle suurentamalla objektiivin aukkolukua eli rajoittamalla valon määrän pääsyä ilmaisimelle. [1.]



Kuva 3. Aukkoluvun vaikutus kuvattavaan kohteeseen [1.]

2.3 Valaisimet

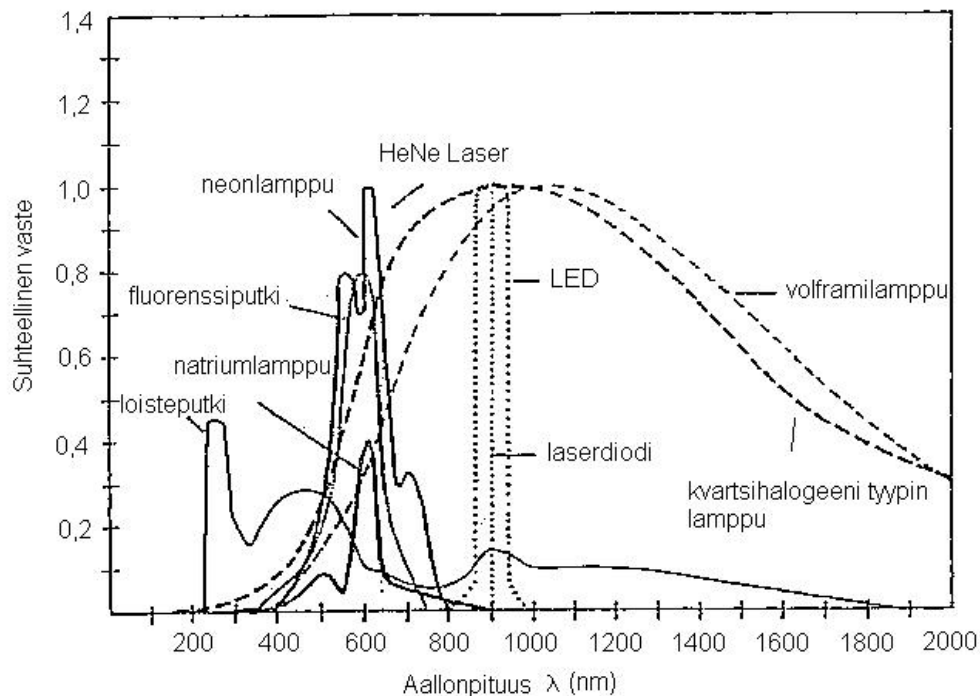
Konenäköjärjestelmiin on valittavissa monenlaisia valaisimia. Valaisimet voidaan jakaa kahteen eri ryhmään, jotka ovat koherenttiset ja ei-koherenttiset valaisimet.

Koherentteihin valaisimiin voidaan lukea laserit sekä maserit. Nämä valaisimet tuottavat kapeakeilaisen (kollimoidun) valonsäteen, jolla on erittäin suuri intensiteetti. Huonona puolena voidaan pitää valaisimien aiheuttamaa Speckle-kohinaa, jonka ansiosta valaistus ei ole pinnalla tasaista. [4].

Ei-koherentteihin valaisimiin luetaan loisteputket, termiset valolähteet, kuten hehkulamppu sekä LED-valaisin. Näillä valaisimilla saadaan valoa laajalta spektrialueelta, jopa UV-alueelta. AC-syötteisien valaisimien ongelma on valon välkkyvyys, josta seuraa poikkeuksetta, ettei valo ole tasaista ajan funktiona. [4.]

Nykyään LED-valaisimilla saadaan DC-syötöllä välkkymätöntä ja kapeakeilaista ja intensiteetiltään voimakasta valoa halutulle alueelle. Ne ovat omiaan sivultapäin tapahtuvalle valaistukselle, taustavalaistukselle tai ylhäältäpäin tapahtuvalle valaistukselle. LED-valaisimilla voidaan tuottaa erivärisiä valokeiloja, kuten valkoista, sinistä, keltaista ja punaista. [4].

Kuvassa 4 on esitetty eri valaisimien suhteellinen vaste eri aallonpituuksilla.

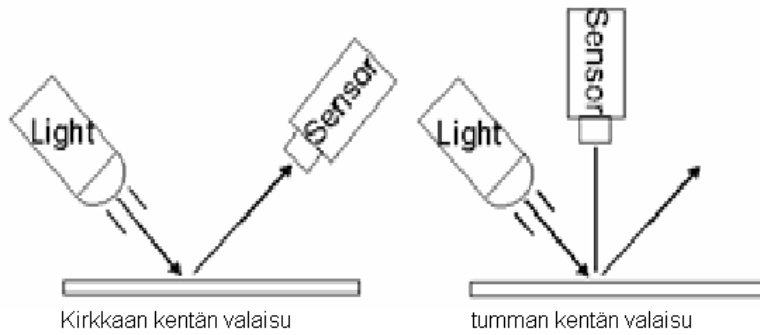


Kuva 4. Eri valaisimien spektrialue [1.]

Valaistustekniikka

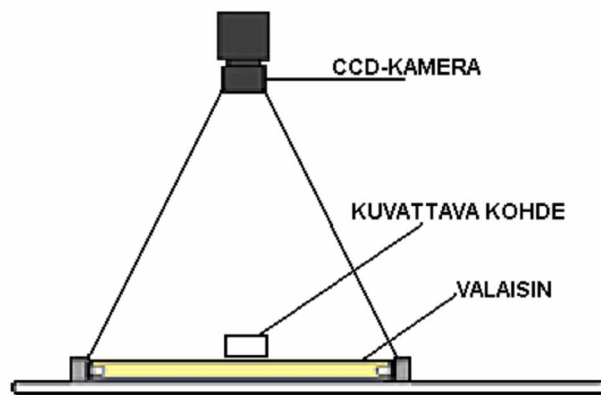
Valaistustekniikalla pyritään tuomaan kohteesta esille haluttuja ominaisuuksia ja minimoimaan häiritseviä tekijöitä kuten esimerkiksi heijastumista. Koska sovellusalueita on hyvin monia, on oikeanlaisen valaisutekniikan valinta tärkeää. Valaistuksen valintaan liittyy oleellisesti kuvattava kohde, sen materiaali, kohteen ympäristö sekä seikat, joita halutaan kohteesta tarkastella. Seuraavassa on esitelty yleisesti käytettyjä tekniikoita. [4.]

Tumman ja kirkkaan kentän valaisussa valonlähde ja ilmaisin asetetaan toisiinsa nähden siten, että vasteessa näkyy joko kirkas tai tumma alue. Menetelmää voidaan käyttää pinnan tarkastukseen, jossa kappale heijastaa valoa. Tällöin kirkkaan kentän vasteessa pinnan virheet (sä-röt, kohoumat) erottuvat tummana ja puolestaan tumman kentän vasteessa virheet erottuvat kirkkaina. Kuvassa 5 on esitetty tekniikan periaatekuva. [4.]



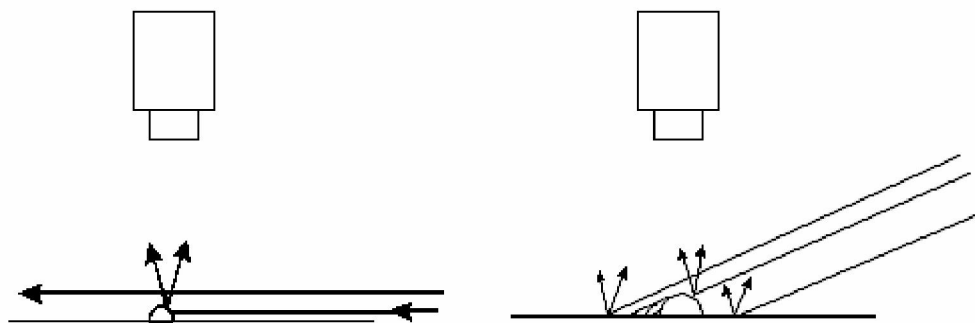
Kuva 5. Kirkkaan ja tumman kentän valaisutekniikka [4.]

Taustavalaistuksessa kohteesta saadaan esille sen siluetti eli ääriviivat. Se on hyvä ratkaistu, jos tarkastelun kohteena on kappaleen muoto. Kuvassa 6 on esitetty kyseessä oleva tekniikka.



Kuva 6. Taustavalaistustekniikka [4.]

Sivustapäin suunnatulla valaistuksella kohteesta saadaan esille heijastumia tai varjoja. Menetelmä sopii erinomaisesti pienten kohoumien mittaamiseen kuvausgeometrian avulla. Kuvassa 7 on esitetty menetelmän periaatekuva.



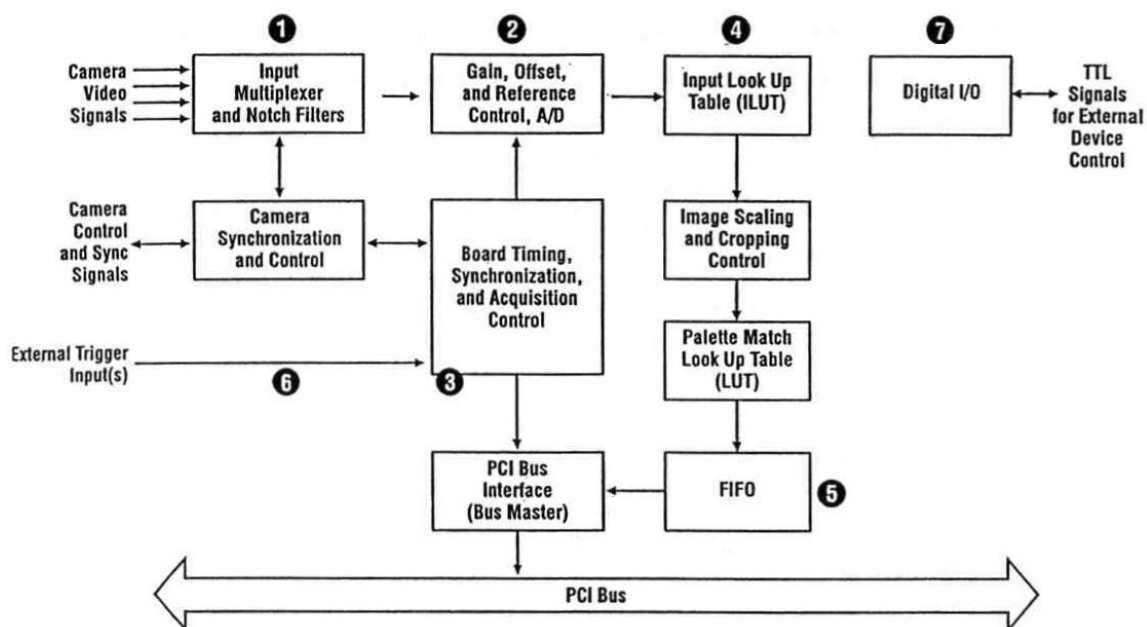
Kuva 7. Sivultapäin suunnattu valaisutekniikka [4.]

2.4 Kuvankaappauskortit

Digitaaliseen kuvankäsittelyyn tarvitaan digitaalinen kuva. Analogisen kuvasignaalin siirtämiseen kameralta tietokoneelle tarvitaan kuvankaappauskortteja, jotka muuttavat kuvan digitaaliseen muotoon, jotta kuvia voidaan käsitellä kuvankäsittelyohjelmilla. Kuvankaappauskortteja valmistetaan useiden eri yritysten toimesta, ja niitä on saatavilla useimpiin dataväyliin. Kuvankaappauskortin valintaan vaikuttaa oleellisesti kamerassa oleva liitäntä. [1.]

Nykyään on myös saatavilla kameroita, jotka antavat kuvaninformaation suoraan digitaalisena. Yleisesti näihin kameratyyppeihin on jo sisälle rakennettu kuvankaappauskorttia muistuttava järjestelmä, joten koneessa tarvitaan ainoastaan kameraa tukeva portti, esim. Firewire tai USB 2.0.

Kuvassa 8 on esitetty yleisesti käytetyn analogisen kuvankaappauskortin lohkokaavio.



Kuva 8. Tyypillisen kuvankaappauskortin lohkokaaeviorakenne [1.]

Kuvankaappauskortin moduulien toiminta on seuraava:

1. Videotuloaste on liitospinta kamerasignaalille.
2. A/D-muunnin muuttaa analogisen signaalin digitaalseksi signaaliksi.

3. Ajoitus- ja kontrollimoduulissa on kideoskillaattori, joka toimii kellona. A/D-muuntimen ajoitus tapahtuu tässä moduulissa. Moduulin kello toimii osana synkronointipiiriä, jonka tehtävänä on tahdistaa kortti kameralta tuleviin ajoituspulsseihin.
4. Kuvanprosessointimoduulilla kuvalle voidaan jo suorittaa kuvankäsittelyä.
5. Tässä esimerkissä väylänä toimii PCI-väyläliitäntä. Se voi olla yhtä hyvin jokin muukin väylä. Kuvankaappauskortti toimii yleensä väyläisäntänä.
6. Ulkoinen liipaisu.
7. Digitaalisella I/O-portilla kortti voidaan kytkeä muihin laitteisiin.

Kuvankäsittely on usein raskasta PC:n prosessoitavaksi, mistä johtuen joillakin korteilla saat-
taa olla oma signaaliprosessori. [1.]

3 DIGITAALINEN KUVANKÄSITTELY

Digitaalisessa kuvankäsittelyssä käsiteltävä kuva voidaan ymmärtää spatiaalikoordinaatistoon sijoitetuista pikseleistä, ja sen koko riippuu käytetystä resoluutiosta. Tämän koordinaatiston (0,0)-kohta on yleensä vasemmassa yläkulmassa ja oikeassa alakulmassa on toinen ääripää, esim. 1024,1024.

Digitaalisessa kuvankäsittelyssä harmaasävyiset kuvat riittävät usein tarkasteltavaksi. 8-bittisen (värisyvyys) kuvan jokaisen pikselin arvo on jaettu 0–255 harmaasävyyden, jossa 225 on täysin valkoinen ja 0 täysin musta. [1].

3.1 Segmentointi

Kuva-analyysiä varten on kuvalle suoritettava segmentointi. Sen tarkoituksena on jakaa tarkasteltavaa kuvaa alueisiin eli objekteihin. Kuva-anaalyysin onnistumisen kannalta juuri segmentoinnilla on suurin merkitys. Segmentoinnin onnistumiseen liittyy suuresti myös valaistuksen sopivuus kohteelle. [1].

Kynnystys

Eräs segmentointimenetelmä on kynnystys. Kynnystämisessä kuvassa olevia harmaasävyarvoja pyritään harventamaan yleensä kahteen arvoon eli kuvasta tulee mustavalkoinen. Muutos tapahtuu määrittämällä tietty raja-arvo, jonka ylittävät harmaasävyarvot luetaan ykköseksi ja sen alittavat arvot luetaan nolllaksi. [1].

3.2 Morfologiset operaatiot

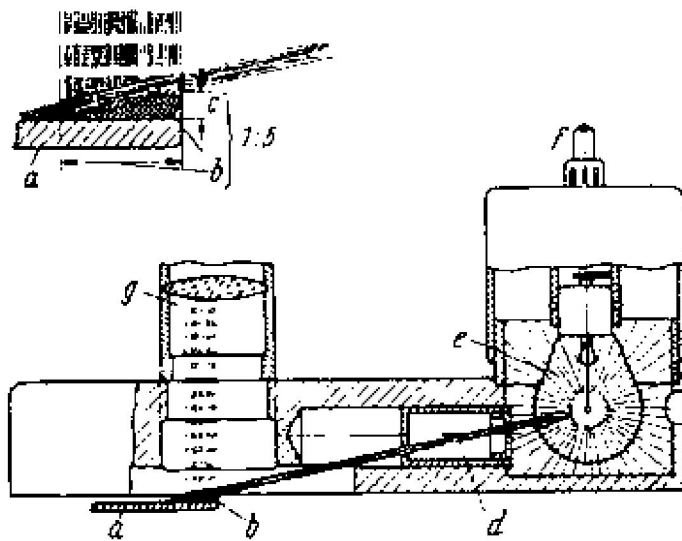
Morfologisilla operaatioilla kynnystettyä kuvaa voidaan vielä muokata. Se tapahtuu skannaamalla kuva-alue esim. 3x3 olevan strukturointielementin avulla. Tulos riippuu strukturointielementin valinnasta. Yleisesti näitä operaatioita käytetään joko kohteen supistamiseen (eroosio), laajentamiseen (dilaatio), tasoittamiseen (close/open) tai kohteen etsimiseen (hit-

miss). Kaikki morfologiset operaatiot voidaan suorittaa dilaation, eroosion ja hit-miss-funktioiden kombinaatioilla. [1].

4 TYÖSSÄ KÄYTETYT LAITTEISTOT JA OHJELMISTOT

4.1 Vanha laitteisto

Työssä käytetty mittausmenetelmä perustuu vuonna 1975 tehtyyn saksalaisvalmisteiseen jäystemittariin. Vanhassa laitteessa valonlähteenä toimii 15-wattinen hehkulamppu, josta lähtevä valo tuodaan pienestä raosta mitta-alueelle. Mitattavalta kohteelta paikallistetaan jäyste joko katsomalla tai kokeilemalla sormenpäällä. Mittalaite asetetaan tälle jäystealueelle, ja jäysteen korkeus on luettavissa laitteen objektiivissa olevalta mitta-asteikolta. Asteikossa on seitsemän pääviivaa, joiden pituus vastaa $100\text{ }\mu\text{m}$:n matkaa ja jokaisen pääviivan välissä on viisi apuviivaa, jotka vastaavat $20\text{ }\mu\text{m}$:n matkaa. Näin ollen laitteen asteikko on $0\text{--}700\text{ }\mu\text{m}$ ja epätarkkuus $20\text{ }\mu\text{m}$. Laitteen toimintaperiaate on esitetty kuvassa 9. [2].



Kuva 9. W.D. Kuehn, Opt. Mechanische Anstalt, Berlin-Steglitz -mallisen saksalaisvalmisteisen laitteen toimintaperiaate, jossa a) on tarkasteltava kohde, b) varjokuva, c) jäysteen korkeus ($c : b = 1 : 5$), d) valonsäde, e) valonlähde, f) kytkin/katkaisija ja g) optiikka [2].

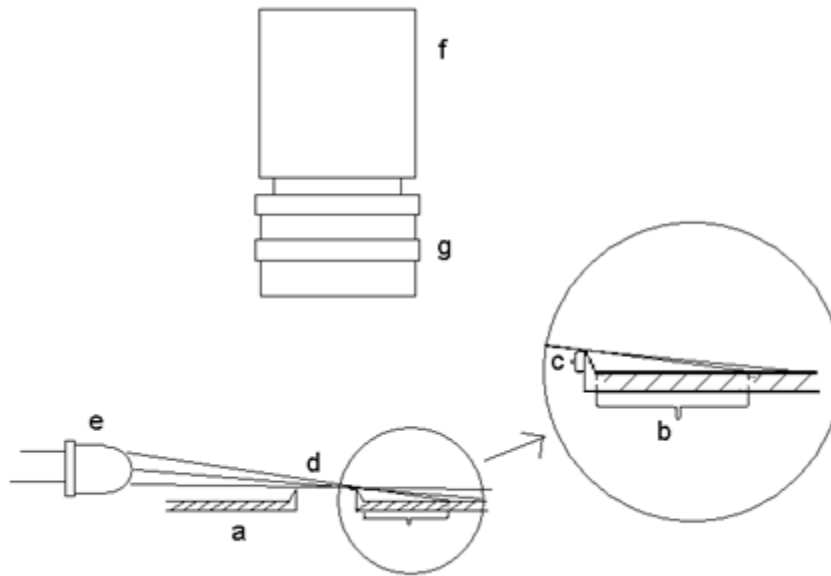
Laitteella mitattu jäyste näkyy optiikasta katsottuna tummempana alueena muuta taustaa vasten. Sen määrittäminen tarkasti on hankalaa, sillä varjon reuna-aluetta ei aina erota selkeästi. Tässä työssä mitattavissa roottorilevyissä jäysteen korkeus oli tyypillisesti $20\text{--}300\text{ }\mu\text{m}$ ja muodoltaan kolmiomainen. Kuvassa 10 on esitetty laitteen fyysinen muoto



Kuva 10. W.D. Kuehn, Opt. Mechanische Anstalt, Berlin-Steglitz -mallinen jäystemittari

4.2 Uusi laitteisto

Uusi laitteisto on periaatteeltaan vanhan laitteiston mukainen, ja sen kaaviokuva on esitetty kuvassa 11.



Kuva 11. Uuden laitteiston kaaviokuva, jossa a) on tarkasteltava kohde, b) varjokuva, c) jäysteen korkeus) d) valonsäde, e) valonlähde, f) kamera ja g) optiikka

Valonlähteenä toimii kaksi valkoista LED-valaisinta, joiden valokeilat on suunnattu toistensa päälle. Näin kuvattavalle kohdealueelle saadaan varjon reunan ja levyn välille mahdollisimman suuri kontrasti, jonka ansiosta kynnystäminen on helpompaa. Kamera toimii tässä tapauksessa "havainnoitsijana" ja syöttää jäystevarjokuvan monitorille käyttäjää varten.

Kameran objektiivilla fokusoidaan kuva mahdollisimman teräväksi, ja aukkoluku pyritään säätämään mahdollisimman suureksi, eli himmentimen aukko on mahdollisimman pieni. Suurella aukkoluvulla syvyysterävyys paranee, mutta kuvan kirkkaus heikkenee, mikä puolestaan vaikeuttaa sopivan kynnystysarvon löytämistä.

Kameran syöttämälle kuvalle suoritetaan kuvankäsittelyoperaatioita, joiden avulla varjokuvan pituus määritellään. Järjestelmällä olisi tarkoitus pystyä mittaamaan $10\text{ }\mu\text{m}$:n epätarkkuudella.

Kuvassa 12 on esitetty työssä käytetty protolaitteisto.



Kuva 12. Työssä käytetty protolaitteisto

4.2.1 Kamera

Kameraksi valittiin Marlin F131 B Allied Vision Technologiesin valmistama IEEE 1394 -kamera, sillä erillistä kuvankaappauskorttia ei tarvita, mikäli koneesta löytyy 6-nastainen Firewire-liitäntä. Lisäksi kameran resoluutio antaa hyvän tarkkuuden kuvalle. Kamera antaa 8-bittisen harmaasävykuvan, joka riittää hyvin varjon tunnistamiseen.

Kameran tärkeimmät tiedot ovat:

- Marlin F131 B Allied Vision Technologies GmbH
- CMOS-kenno, koko 2/3"
- Resoluutio 1280 * 1024 (format 7, mode 0)
- Yhden pikselin koko kennolla 6,7 μm * 6,7 μm



Kuva 13. Työssä käytettävä Marlin F131 B -tyyppinen kamera

4.2.2 Objektiivi

Objektiiviksi valittiin Rainbowin objektiivi 16 mm:n polttovälillä, sillä se antaa hyväksi todetun kuva-alueen. Loittorengas käyttö pienentää kuvausetäisyyttä sekä tarkentaa kuvaa.

Käytetyn objektiivin ominaisuuksia:

- Rainbow S16 mm, Japan
- 1:1,4
- 2/3"
- Loittorengas 5 mm



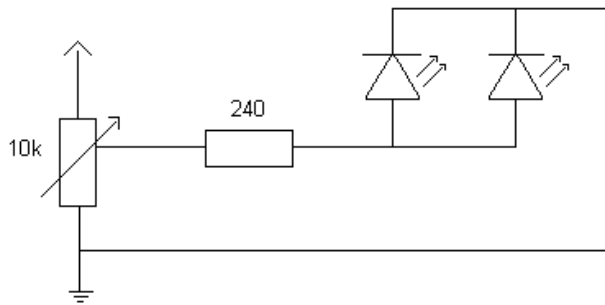
Kuva 14. Työssä käytetty objektiivi

4.2.3 Valaisinjärjestelmä

Valaisinjärjestelmä kytkentään tarvittavat komponentit:

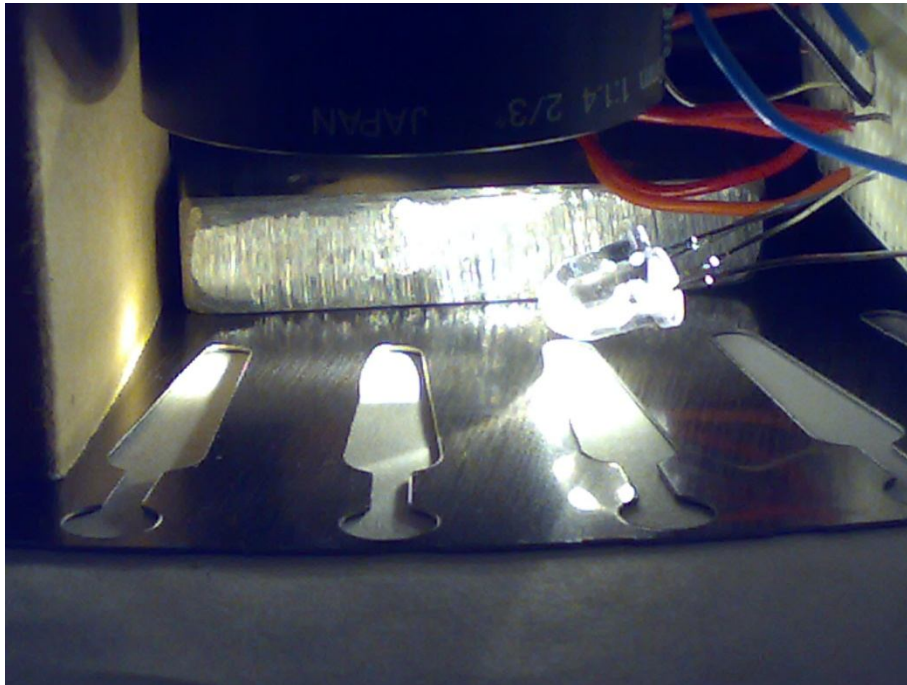
- 10 VDC
- Valkoinen LED, 2 kpl
- Trimmeri 10 k Ω
- Vastus 240 Ω

Valaisimena tässä työssä toimii kaksi tavallista valkoista LEDiä, jotka ovat kytketty rinnakkain sarjaan etuvastuksen kautta. Trimmerin tarkoitus on säätää kirkkautta, sillä etuvastus rajoittaa LEDien maksimivirran n. 14 mA:iin (maksimi virransieto 30 mA). Kytkenäkaavio on esitetty kuvassa 15.



Kuva 15. Sivulta päin käytetty valaisukytkenä

Valaistus asetetaan kameran objektiivin alapuolelle osoittamaan sivultapäin jäysteistä aluetta kuvan 16 mukaisella tavalla.



Kuva 16. LEDien asettaminen kuvattavaan kohteeseen

4.2.4 Ohjelmistot

LabVIEW

LabVIEW on graafinen ohjelmointiympäristö, jonka National Instruments on kehittänyt. Ohjelmointikielenä käytetään G-kieltä ja se on tietovuo-ohjelmointikieli. Ohjelmassa on käytössä kaksi pääikkunaa: etupaneeli (käyttöliittymä) ja vuokaavio (ohjelmointi). Etupaneeliin luodaan käytettävät kontrollit, joilla kontrolloidaan ohjelmaa sekä tiedon tarkastelua varten sille sopivia indikaattoreita esim. graafeja tai tulosikkunoita. LabVIEW:ssä ohjelmointi tapahtuu langoittamalla halutut funktiokuvakkeet toisiinsa kiinni ja on täten helposti seurattavissa.

Ohjelma soveltuu erinomaisesti mm. mittausteknillisiin sovelluksiin, kuten konenäköön liittyviin ratkaisuihin. Ohjelmalla on mahdollista lukea dataa suoraan tiedonkeruukortilta, kuvankaappauskortilta tai kameralta, mikä mahdollistaa nopean tiedonkäsittelyn reaaliajassa.

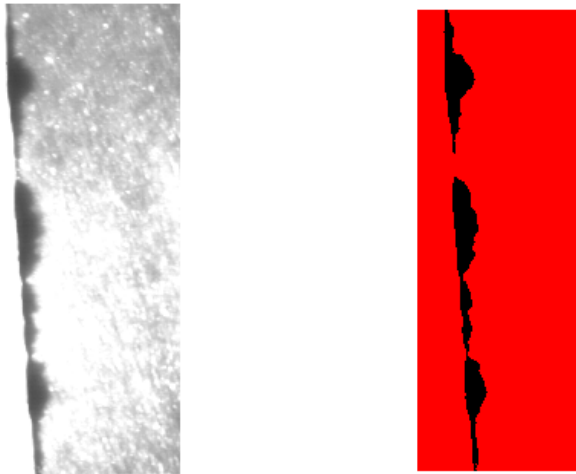
Vision Assistant

Vision Assistant -ohjelma on National Instrumentsin kehittämä testaus- ja kehitysympäristö konenäkö- ja kuvankäsittelysovelluksille. Ohjelmalla voidaan nopeasti testata eri kuvankäsittelyoperaatioiden vaikutuksia kuvaan lisäämällä haluttu operaatio valikoista prosessisarjaan (skriptiin), johon voi aina halutessa lisätä operaatioita. Ohjelmalla voidaan myös laskea geometrisia ominaisuuksia kuten reunojen välisiä etäisyyksiä tai haluttujen pisteiden välisiä kulmia. Valmiille kuvaprosessisarjalle voidaan ajaa useita kuvia, joille suoritetaan samat operaatiot. Tämä on omiaan sovellukselle, jossa halutaan tietää vaikkapa liukuhihnalta tulevien tuotteiden yhdenmukaisuutta. Sarjasta voidaan myös luoda skriptitiedosto, joka voidaan puolestaan kääntää LabVIEW-ohjelmointiympäristölle yhteensopivaksi .vi-tiedostotyyppiksi. Ominaisuutensa vuoksi ohjelmalla voidaan helposti tehdä käytettävä ohjelmarunko, jota täydennetään LabVIEW-ohjelmalla.

Ohjelman runko

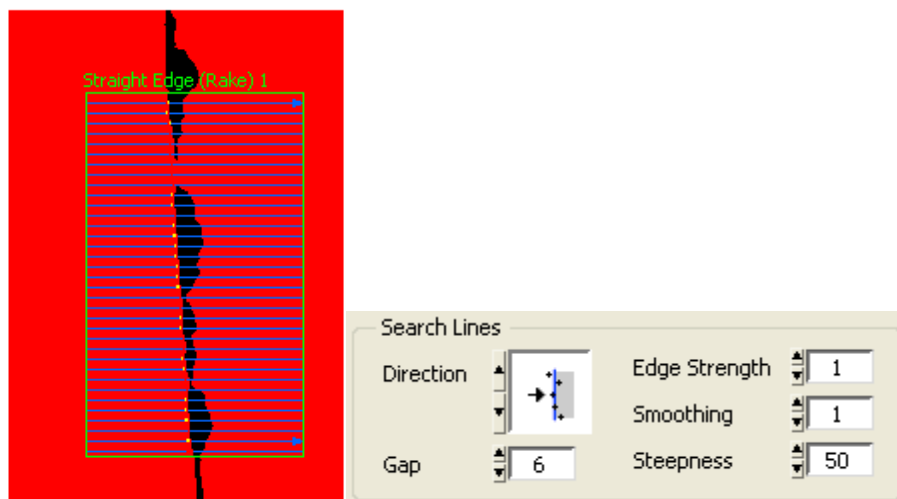
Ohjelman runko tehtiin Vision Assistant -ohjelman avulla. Sen avulla voidaan helposti simuloida kuvattavaan kohteeseen tehtyjä kuvankäsittely- ja mittausoperaatioita. Seuraavassa kappaleessa on esitelty mittaustapahtuman kulku pääpiirteittäin.

Mittaus alkaa kuvaamalla tarkasteltavaa kohdetta Firewire-kameralla. Saatua kuva kynnystetään sopivalla arvolla, jotta kuvasta saadaan erotettua varjokuva taustasta. Sopivan kynnystysarvon löytäminen on tärkeää, ja sitä saattaa joutua muuttamaan riippuen kohteesta, sillä mitatut levytyypit eivät ole samanlaisia, vaan ovat sävyltään tummempia tai kirkkaampia kuin toiset. Kuvassa 17 on esitetty kuvattava kohde sekä kynnystetty kuva.



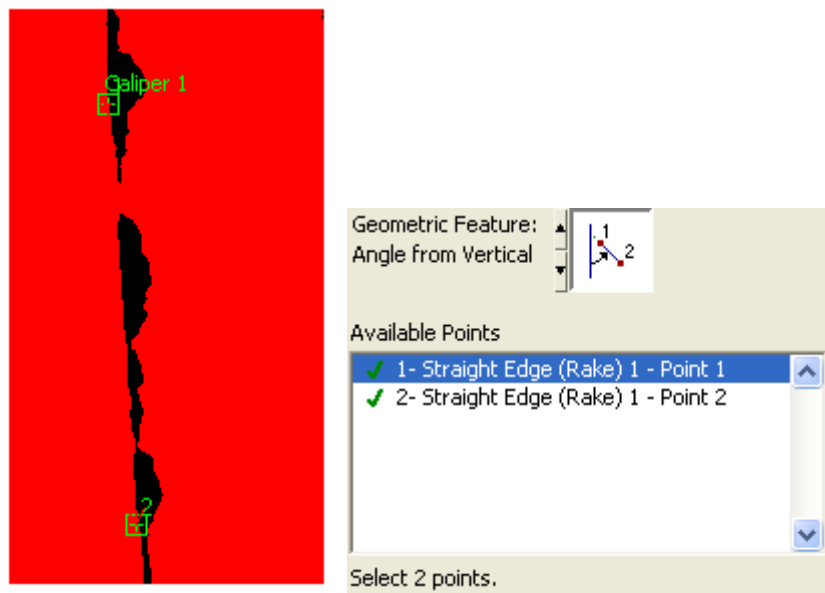
Kuva 17. Tarkasteltava kuva ja se kynnystettynä

Valaistuksen ansiosta kuvasta 17 jäysteen aiheuttamat varjot erottuvat jo ilman kynnystystä, mutta digitaalisessa kuvankäsittelyssä kuva pitää kynnystää, jotta sille voidaan suorittaa mittausoperaatioita. Seuraavaksi kynnystetystä kuvasta etsitään reuna-alue *Straight Edge*-operaatiolla. Operaatioon määritellään etsittävä suunta, mittausväli, reunan vahvuus, pehmennys sekä jyrkkyys. Kuvassa 18 on esitetty operaation vaikutus.



Kuva 18. Straight Edge -operaation vaikutus kuvaan

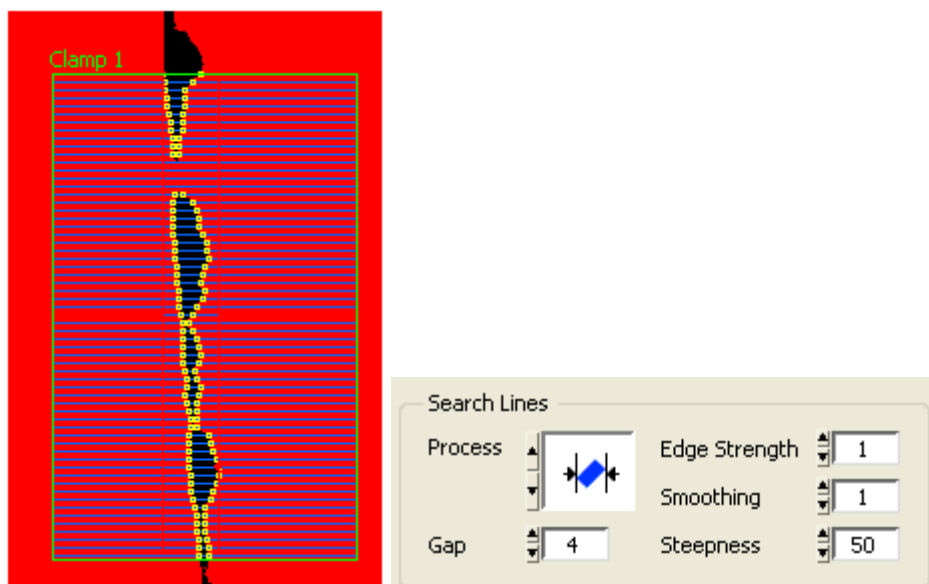
Seuraavaksi kuvalle suoritetaan *Caliper*-operaatio. Operaatiolla voidaan yleisesti ottaen mitata useita eri asioita, kuten välimatkoja tai kulmia. Tässä työssä haluttiin tietää *Straight Edge*-funktion päätepisteiden välille piirretyn suoran kulma suhteessa pystysuuntaan (vertical). Operaatiolle on syötettävä geometriset ominaisuudet, eli mitä mitataan ja mahdollisesti minä suhteen sekä mittapisteet. Operaatio on esitelty kuvassa 19.



Kuva 19. Caliper-operaation vaikutus kuvaan

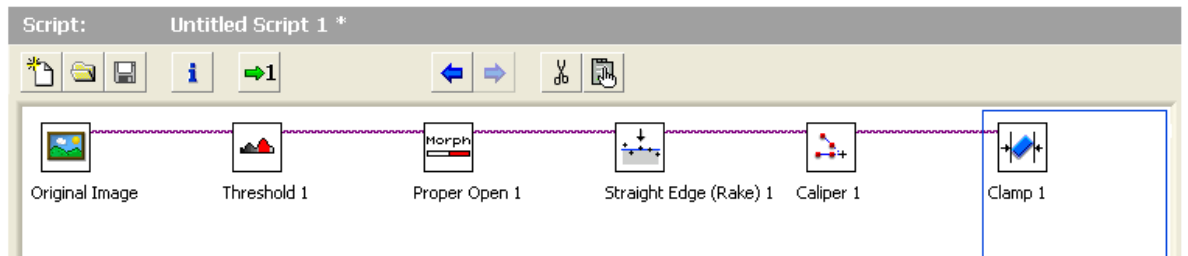
Tässä tapauksessa kulma halutaan tietää pystysuunnan suhteen, joka valitaan *Geometric Feature* -kohdasta.

Lopuksi kuvattavaan kohteeseen käytetään *Clamp*-funktia. Sen tarkoitus on mitata yleisesti ottaen etäisyyksiä. Kuten *Straight Edge* -operaatiolle, *Clamp*-operaatiolle syötetään samat arvot. Kuvassa 20 on esitetty operaation vaikutus.



Kuva 20. Clamp-operaation vaikutus kuvaan

Kuvattavalle kohteelle suoritetaan siis kaiken kaikkiaan alla olevan kuvan 21 mukaiset toimenpiteet.



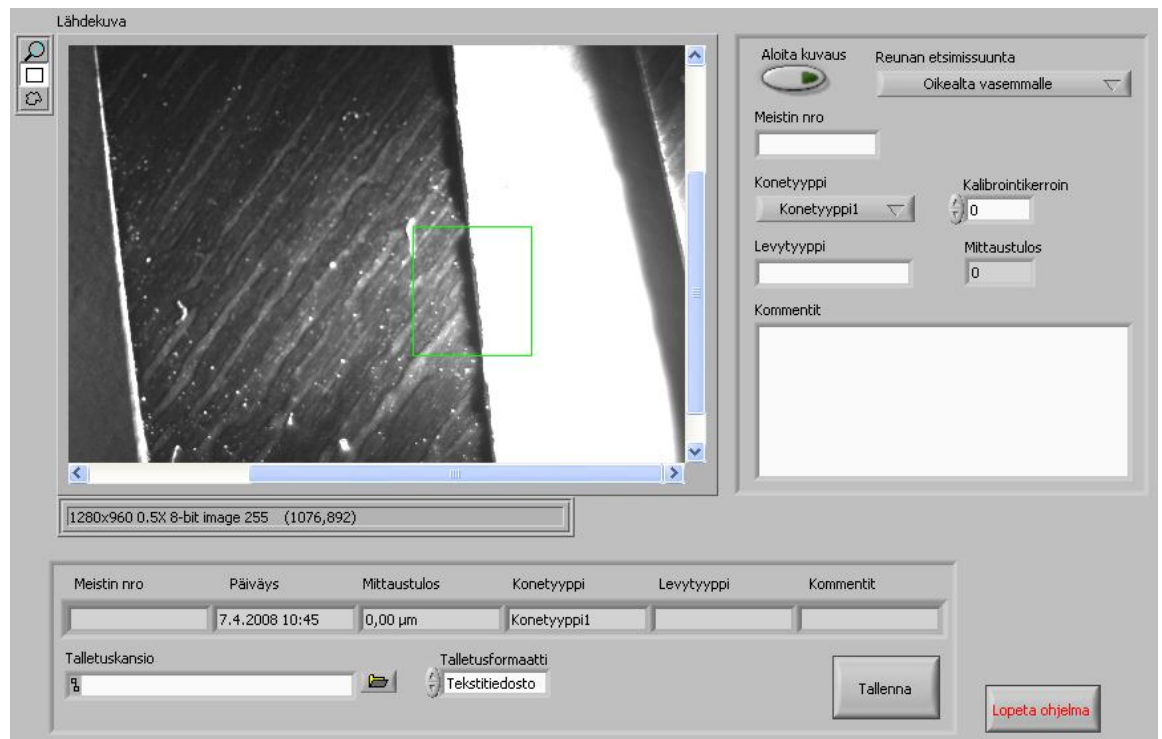
Kuva 21. Mittausmenetelmä

Scriptissä olevan *Proper Open 1*:n tarkoitus on terävöittää kuvan reunoja ilman, että kuvattavan kohteen muoto muuttuisi.

Tätä skriptiä käytetään hyväksi LabVIEW-ohjelman runkona.

5 OHJELMISTON TOTEUTTAMINEN

Ohjelman käyttöliittymä on kuvan 22 mukainen. Kuvaus aloitetaan "Aloita kuvaus"-painikkeesta, jolloin kamera syöttää lähdekuvaa kohteesta. Kuvaus voidaan lopettaa, kun haluttu kohde on näytöllä painamalla uudestaan "Aloita kuvaus"-painiketta.



Kuva 22. Ohjelman käyttöpaneeli

Kun kuvaus on pysäytetty, käyttäjä rajaa tutkittavan kohteen "rectangle"- tai piirtotyökalulla, jotka ovat valittavana lähdekuvan vasemmalta puolelta "Zoomin" alapuolelta. Rajausta ei voida suorittaa, mikäli kuvaus on käynnissä. Ohjelma analysoi rajattua aluetta ja suorittaa sille kuvankäsittelyoperaatioita sekä mittauksia.

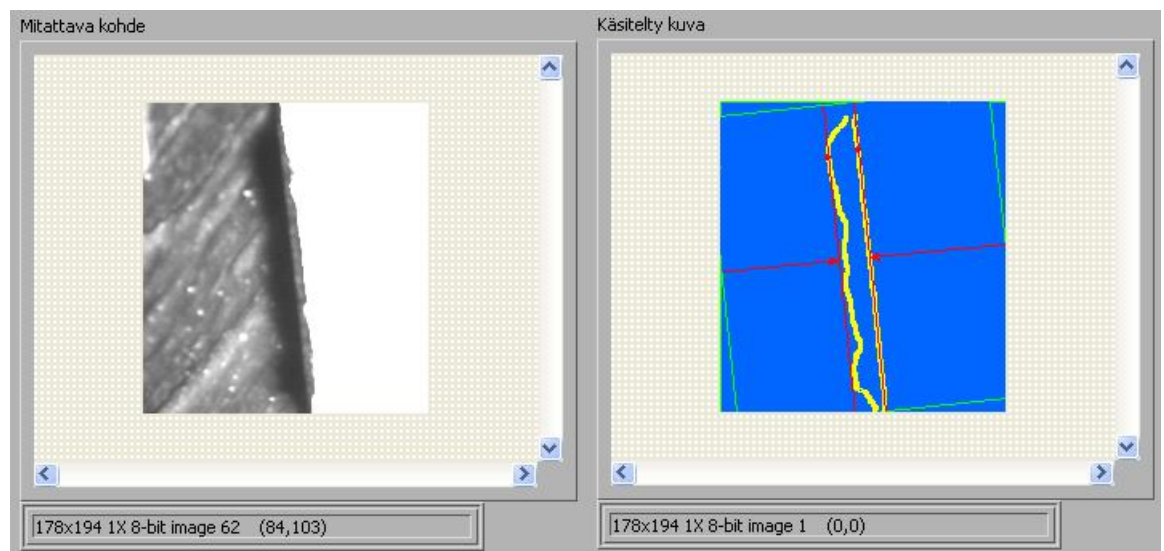
Lähdekuvaikkunan alapuolella on ilmoitettu kuvan resoluutio, tarkennuskerroin, harmaasävykuvan värisyvyys, kuvan harmaasävyarvo sekä kursorin pistekoordinaatit.

Tiedon tallentamista varten käyttäjä syöttää meistin numeron, jota käytetään myös tallennuskirjastona, jonne tulokset tallennetaan jo luonnostaan päiväyksen mukaan. Tallennustietoihin kirjataan myös muita oleellisia tietoja, kuten konetyyppi, levytyyppi sekä käyttäjän havaitse-

mat kommentit mittauksesta. Lähdekuvaikkunan alapuolella on vielä tallennuksen esikatselu, talletuskansio sekä formaatti, jolla tulokset halutaan tallettaa. Talletusformaattimahdollisuuksia ovat Excel-taulukko, tekstitiedosto ja Word-dokumenttiformaatti.

Kuvattava kohde voi olla periaatteessa missä kulmassa tahansa, sillä ohjelma etsii kuvasta reunan ja mittaa sen kulman vertikaali akselin suhteen. Saadun kulman perusteella ohjelma kääntää *Clamp*-funktion mittaamaan kohtisuorasti seuraavalle havaitulle reuna-alueelle ja mittaa etäisyyden. Mittauksen onnistumisen kannalta käyttäjä joutuu valitsemaan reunan etsimissuunnan, jotta funktio osaa etsiä oikeasta suunnasta. Muuten tulokset saattavat olla virheellisiä. Mittaustulos annetaan suurimmasta reunojen välille jääneestä suorasta, ja sen pituus ilmoitetaan pikseleinä, joka muutetaan kalibrointikertoimen avulla mikrometreiksi.

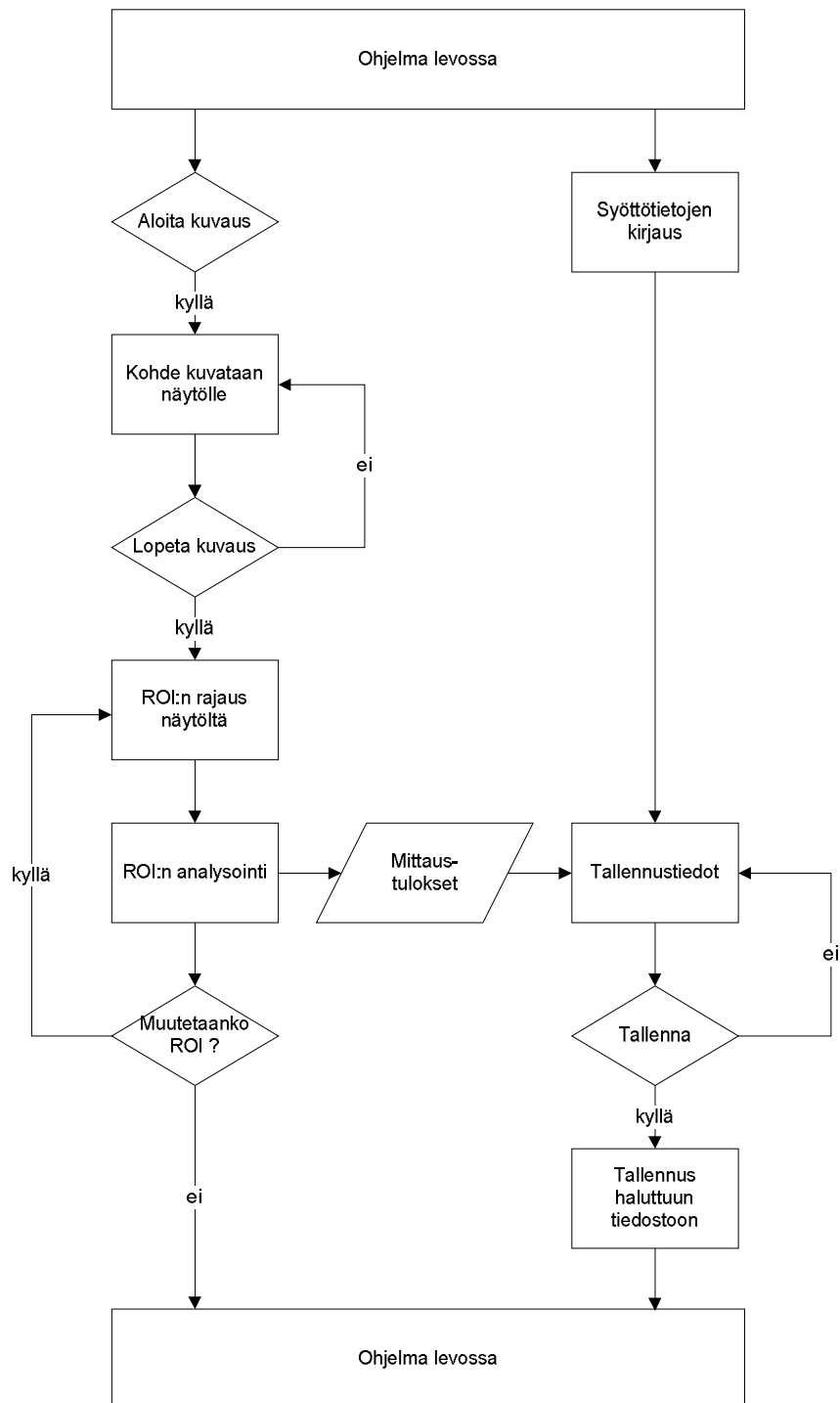
Mittaustuloksia voidaan seurata kahden ikkunan avulla, jotka ovat piilotettuina, koska niillä ei ole käyttäjän kannalta merkitystä. Ikkunat saadaan kuitenkin esille, mikäli ohjelma halutaan kalibroida muuttamalla esim. kynnystysarvoja. Ikkunat ovat esitelty kuvassa 23.



Kuva 23. Mittaustulosikkunat

"Mitattava kohde" -ikkuna näyttää ROI:n, jolle suoritetaan aikaisemmin mainitussa skriptissä olevat operaatiot. "Käsitelty kuva" -ikkunassa nähdään punaiset mittapisteet, joiden välimästä tulos lasketaan.

Kuvassa 24 on esitelty ohjelman lohkokaavio.

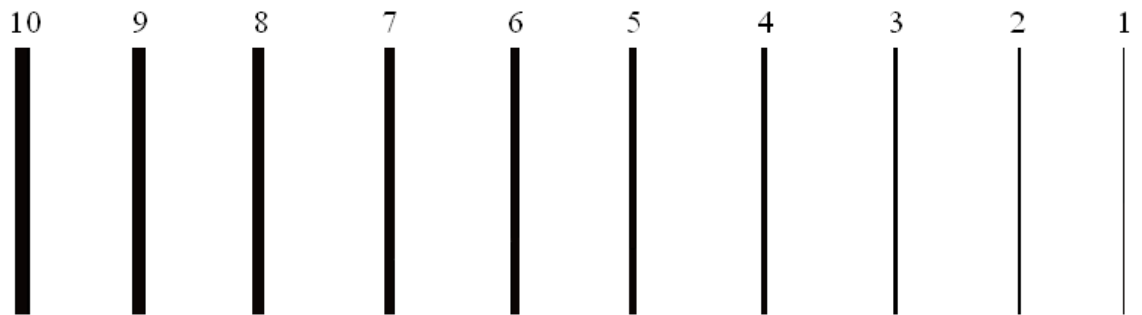


Kuva 24. Ohjelman lohkokaavio

6 TESTAUS

6.1 Kalibrointi

Koska ohjelma mittaa pikseleitä, on oikean kalibrointiarvon määrittäminen tärkeää tulosten kannalta. Kalibrointiarvon määrittämiseksi luotiin kuvan 25 mukainen kalibrointikuva, jossa on kymmenen eripaksuista viivaa, jotka ovat pikselin verran paksumpia kuin edelliset.



Kuva 25. Testi-/kalibrointikuva

Testikuva tulostettiin siten, että 1 cm kuvassa vastaa 200 pikseliä, tämä siis tulostimen tarkkuuden puitteissa. Näin ollen yhden pikselin koko on $50\ \mu\text{m}$ tällä resoluutiolla. Kameralta saatu pikselimäärä poikkeaa, tästä johtuen kameran resoluutiosta. Testikuvan viivat edustavat jäysteen varjoa, ja se mitattiin vanhemmalla saksalaisvalmisteisella jäystemittarilla. Mittaus on välttämätöntä, sillä tulostimen tarkkuutta näin pienillä arvoilla on syytä epäillä. Tulokset laskettiin vielä luodulla ohjelmalla, ja sen antaman tuloksen perusteella laskettiin kalibrointi-arvo. Sen tulisi olla sama kussakin tapauksessa. Tulokset on esitetty taulukossa 1. Kalibrointi tulisi suorittaa joka kerta, kun kuvausetäisyyttä tai valaisimia liikutetaan.

Taulukko 1. Testitulokset

Pikselimäärä	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Jäystemittari (μm)	50	105	150	200	260	300	360	420	460	520
Ohjelman mittaama matka (pikseli)	18,72	31,8	43,1	57,5	68,2	77,8	92,7	106,8	116,1	130,9
Kalibrointikerroin ($\mu\text{m}/\text{pikseli}$)	2,67	3,30	3,48	3,48	3,8	3,87	3,88	3,93	3,96	3,97

Kuten tuloksista huomataan, kalibrointikerroin ei ole sama. Kuitenkin arvot muuttuvat pahimmillaan vain 1,3 pikseliä, joka ei muuta tuloksia merkittävästi (pysyy $10\ \mu\text{m}$ epätarkkuusvaatimuksen rajoissa). Jäystemittarilla saadut arvot poikkeavat myös jonkin verran siitä, mitä niiden pitäisi olla. Jäystemittarilla mittaamiseen liittyy tyypillisesti inhimillisiä virhetekijöitä, kuten käyttäjän pätevyys sekä silmän väsyminen, kun toista silmää pidetään suljettuna pidemmän aikaa.

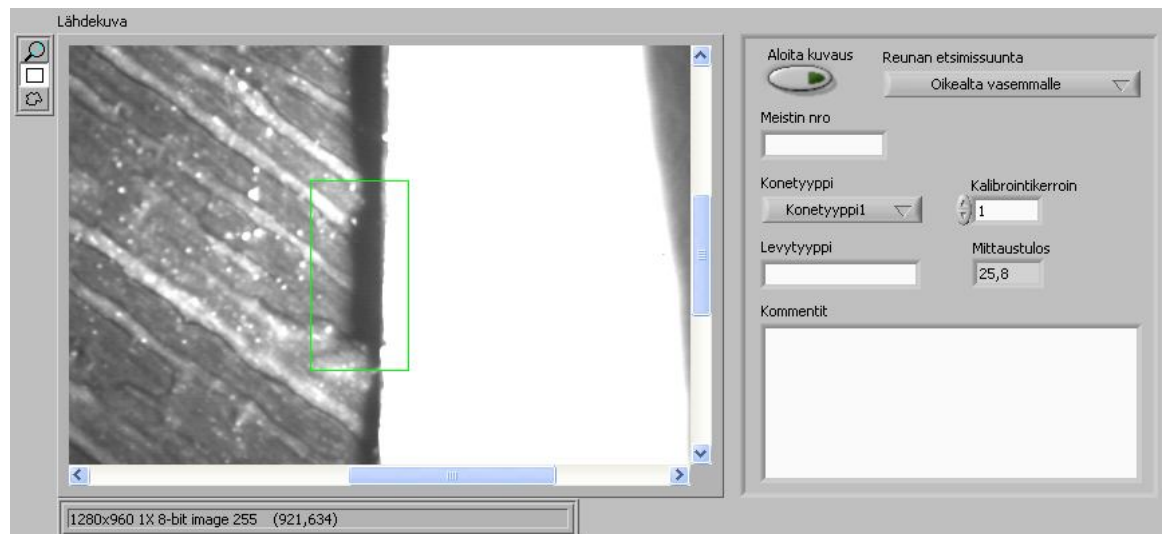
Lopulliseen kalibrointikertoimeen laskemiseksi valitaan ainoastaan arvot välillä 1-6, sillä jäysteen korkeus on tyypillisesti $20 - 300\ \mu\text{m}$. Näin laskelmalla kalibrointi arvoksi saadaan $3,58$ pikseliä/ μm . Kalibrointi arvo on samalla järjestelmän erottelukykyarvo.

Tämä kalibrointi arvo pitää paikkansa ainoastaan, mikäli uuden järjestelmän valaisimet on asetettu yhtä etäälle, kuin saksalaisvalmisteisessa laitteessa. Kuitenkin todettiin, että kun valaisimet asetettiin yhtä etäälle, kuin saksalaisvalmisteisessä jäystemittarissa, kuvan kirkkaus ei riittänyt varjokuvan erottamiseen. Näin ollen kalibrointi arvo jouduttiin käytännössä laskemaan vertaamalla saksalaisvalmisteisen ja ohjelman antamia arvoja. Menetelmällä saadaan laskettua kalibrointi arvo, mutta se edellyttää tarkkoja mittauksia jäystelevyiltä, mikä sinänsä on paikoin todella hankalaa.

6.2 Testitulokset

Testeissä havaittiin myös toinen seikka. Koska levytyypit eivät ole samanlaisia, ne heijastavat valoa pinnastaan eri tavoin kuin toiset levytyypit. Tästä johtuen kynnystysarvo muuttuu levytyypin mukaan. Tämä tarkoittaa käytännössä sitä, että jokaiselle levytyypille pitäisi määrittää testaamalla oma kynnystys- tai kalibrointi-arvo. Tässä testissä mitattiin ainoastaan yhtä levytyyppiä.

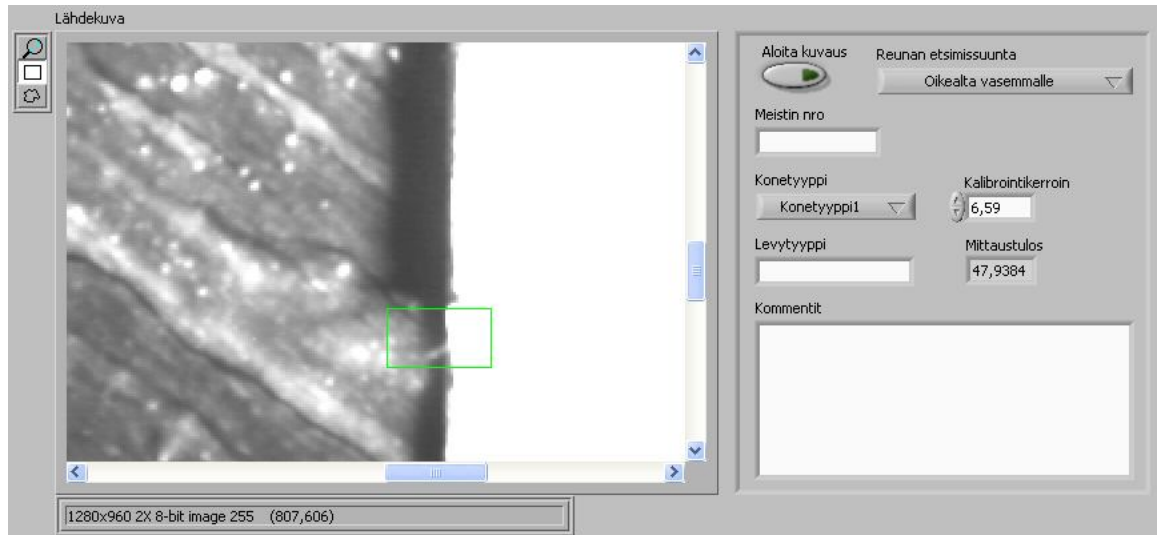
Kuvan 26 jäysteen korkeudeksi mitattiin manuaalisesti n. $170\text{ }\mu\text{m}$, jonka mukaan uusi kalibrointikerroin laskettiin, kun korkeudeksi saatiin aluksi 25,8 pikseliä. Kalibrointikertoimeksi saatiin 6,59.



Kuva 26. Vertailukuva

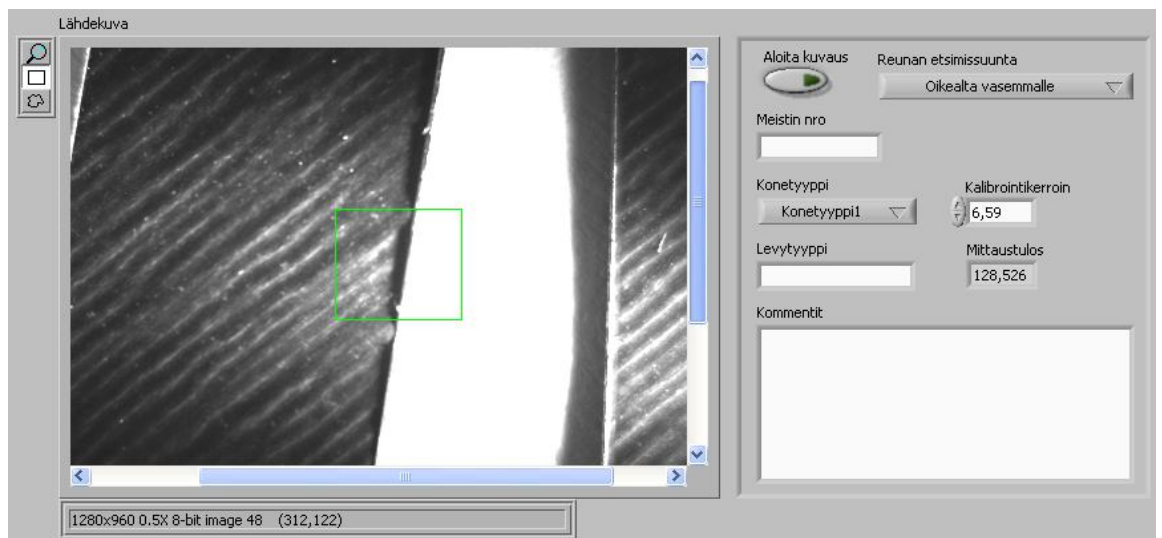
Tällä arvolla mitattiin kolmesta eri kohteesta jäystettä ja tutkittiin sen paikkansa pitävyyttä.

Kuvan 27 kohteen alapuolella on havaittavissa pienempi alue, joka otetaan ensimmäiseksi testikohteeksi. Manuaalisesti korkeudeksi mitattiin n. $50\text{ }\mu\text{m}$, joten $47,9\text{ }\mu\text{m}$:n tulosta voidaan pitää tarkkana. Tulokset on esitetty kuvassa 27.



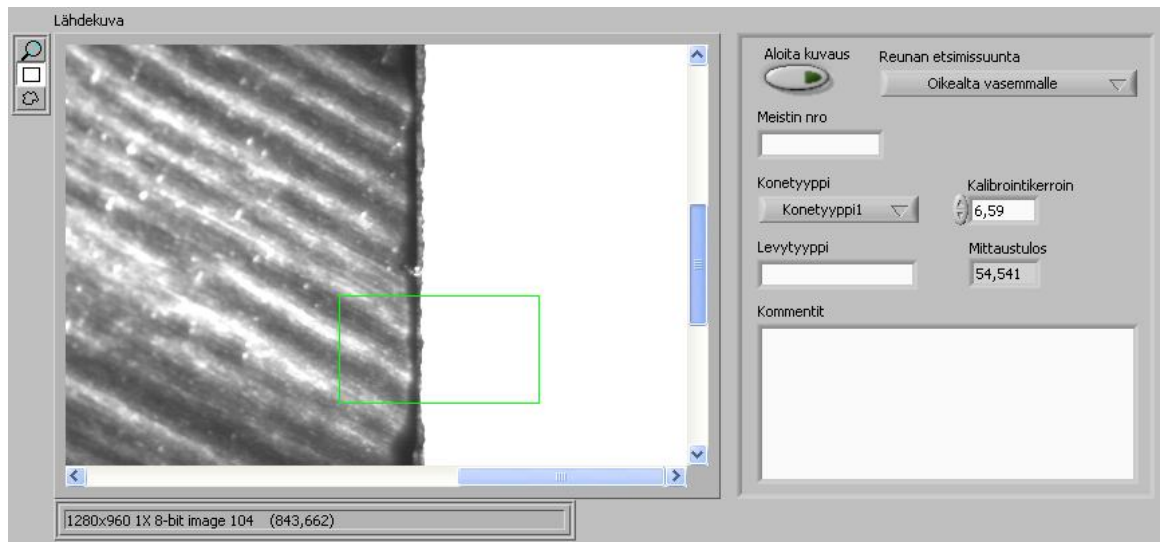
Kuva 27. Ensimmäinen testikohde

Toinen kohde valittiin sattumanvaraisesti samalta levyiltä. Manuaalisesti mitattuna jäysteen korkeus jäi $120\ \mu\text{m}$ ja $140\ \mu\text{m}$ viivojen välille, eli arvoon $130\ \mu\text{m}$. Tulokseksi saatiin $128,5\ \mu\text{m}$, joka on myös nähtävissä kuvasta 28.



Kuva 28. Toinen testikohde

Kolmas testikohde valittiin sattumanvaraisesti siten, että jäyste olisi silmämääräisesti pieni. Manuaalisesti mitattuna tulokseksi saatiin n. $60\ \mu\text{m}$ ja ohjelman määrittämänä vastaavaksi arvoksi saatiin $54,5\ \mu\text{m}$. Mittaustulos on esitetty kuvassa 29.



Kuva 29. Kolmas testikohde

Tulos vastaa mitattua arvoa aika tarkasti.

7 TULOKSET JA NIIDEN TARKASTELU

Järjestelmällä näyttäisi pystyvän mittaamaan jäysteen korkeutta hyvällä tarkkuudella. Mitattaessa samasta kohteesta liikuttamalla rajattua ROI:ta tulokset heittelevät maksimissaan kahden pikselin verran, joka sinänsä huonontaa mittauksen toistettavuuden luotettavuutta. Kuitenkin jos kalibrointikertoimen saa säädettyä vaikka arvoon $4 \mu\text{m}/\text{pikseli}$, kahden pikselin poikkeama säilyttää vielä epätarkkuuden $10 \mu\text{m}$:ssä.

Kalibrointiarvoa saa parannettua mm. valaisimien asemoinnilla. Mitä loivemmassa kulmassa valon osuu jäysteeseen, sitä enemmän se pidentää jäysteen varjoa, mutta samalla varjon terävyys kärsii. Tarkka kalibrointiarvo vaatii tarkkaa referenssimittausta, johon ohjelman antamaa pikseliarvoa verrataan.

Myös levytyyppi vaikuttaa merkittävästi tuloksiin, sillä kirkkaamman levyn harmaasävyarvo on korkeampi kuin tumman levyn. Tämä aiheuttaa kynnistyksen epäonnistumisen samalla arvolla kuvattavassa kohteessa, sillä universaalia jäystevarjon harmaasävyä ei voida määrittää. Tämä voidaan kuitenkin korjata määrittämällä jokaiselle mitattavalle levytyypille oma kynnystysarvo. Esimerkiksi mittausta suoritettaessa käytetty levytyyppi voidaan valita vaikka alasvetovalikosta, joka muuttaa automaattisesti ohjelman kynnystysarvoa.

Valaistuksen täytyy myös pysyä muuttumattomana, jotta tulokset eivät muuttuisi paikasta riippuen. Lopullinen järjestelmä tulisi suojata ulkopuolisilta valonlähteiltä.

8 YHTEENVETO

Insinööriyön tavoitteena oli luoda konenäköön perustuva jäysteenmittausjärjestelmä, jolla voidaan mitata 10 μm :n epätarkkuudella jäystettä Vaasan ABB Motors Oy -yksikön valmistamista roottori- ja staattorilevyistä.

Järjestelmä koostui normaaleista konenäköjärjestelmään kuuluvista komponenteista sekä LabVIEW-ohjelmointikielellä toteutetusta ohjelmasta. Kameralta saatava tarkkuus objektin kera riittää tarkastelua varten. Valaistustekniikaksi valittiin sivultapäin valaisu, sillä muita keinoja varjokuvan saamiseksi ei oikeastaan ole. LEDit toimivat hyvin tähän tarkoitukseen sekä tuottavat riittävän valonlähteen.

Järjestelmän rinnalle luotiin ohjelma, joka soveltuu tarkoitusta varten. Mittaustulokset pitävät paikkansa vain yhdelle levytyypille johtuen levyjen sävyeroista. Tämä voidaan korjata muuttamalla kynnystysarvoa levytyypin mukaan.

Työ onnistui pääpiirteittäin ihan hyvin. Järjestelmä toimii tiettyjen rajoitusten puitteissa sille osoitetulla tavalla. Järjestelmän tarkkuus riippuu hyvin pitkälle kalibrointiaresta.

LÄHTEET

- 1 Romppainen Pentti, Konenäkö luentomoniste. Kajaanin ammattikorkeakoulu.
- 2 W.D. Kuehn, Opt. Mechanische Anstalt, Berlin-Steglitz -laitteen esittelyarkki.
- 3 Romppainen Pentti, Teknillinen optiikka luentomoniste. Kajaanin ammattikorkeakoulu.
- 4 Kärkkäinen Tiina, Valaisugeometria työohje. Kajaanin ammattikorkeakoulu.
- 5 Benati, F. & Sacerdotti, F. & Haizhuang Kang & Gatti S. (2000) Development of a handheld Burr measurement system for statistical process control of the trimming process. IMTC 2000. Proceedings of the 17th IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference. Luettu 5.2.2008. Saatavissa:
<http://ieeexplore.ieee.org/iel5/6822/18336/00848709.pdf?tp=&arnumber=848709&isnumber=18336>

